

양생조건에 따른 플라이애쉬 콘크리트의 소성수축균열 특성

The Plastic Cracking Properties of Fly Ash Concrete with Various Curing Conditions

남재현*

Nam, Jae-Hyun

박종화**

Park, Jong-Hwa

Abstract

In this study, the property and plastic cracking pattern of concrete were compared and analyzed with the replacement ratio of fly ash 0, 5, 10, 15, 20% by cement weight. And curing conditions of concrete were given variously such as indoors(with wind speed as 0, 300, 500m/min), outdoors and chamber.

The hydration temperature had a tendency to decrease as the replacement ratio of fly ash increased, and in the case of the wind speed 0m/min, it was showed that the moment that the amount of evaporation of water from surface of reference concrete was more than the volume of bleeding was 90 min since casting concrete. The time that the crack initiated had a tendency to be more quickly as the replacement ratio of fly ash increased.

The number, length, width and area of crack in the indoor curing, exposed outdoor curing, enclosed outdoor curing had a tendency to decrease as the replacement ratio of fly ash increased. The crack had a tendency to decrease in sequence of exposed outdoor, enclosed outdoor curing, indoors curing.

The outbreak of cracking by the change of temperature and humidity was affected by relative humidity more than temperature and the cracking had a tendency to increase as relative humidity lowered.

키워드 : 소성수축균열, 플라이애쉬, 균열패턴, 양생조건

Keywords : Plastic Shrinkage Cracking, fly ash, cracking pattern, curing conditions

1. 서론

우리나라에서는 1990년대 들어 콘크리트 구조물에 균열로 인한 크고 작은 사고가 빈번해지면서 사회적인 문제로 대두되어, 콘크리트 구조물의 균열발생현상에 대한 관심이 높아지고 있는 시점이다. 이러한 사고가 발생하게 되는 원인으로는 구조물의 설계가 안전성 위주로 행하여지며 사용성과 내구성에 대한 고려가 부족한 점, 최근에 개발된 새로운 재료의 성질에 대한 이해와 대처가 부족했기 때문으로 보고되고 있다.¹⁻³⁾

균열은 크게 구조적인 균열과 비구조적 균열로 분류할 수 있다. 균열 발생의 수많은 원인 중 소성수축(Plastic Shrinkage)으로 인한 균열은 비구조적인 균열로 타설 후 초기에 발생하여 사용성, 내구성 저하와 콘크리트 구조물의 미관을 저해하게 된다. 소성수축균열(Plastic Shrinkage Cracking)은 콘크리트의 단면깊이까지 도달하거나 심할 경우 단면을 관통하는 경우도 발생하게 되어 구조물의 사용성 및 내구성뿐만 아니라 안전에도 심각한 영향을 끼치게 된다. 따라서 소성수축균열로 인한 피해를 최소화하기 위한 관심과 연구가 꾸준히 진행되어져왔다.⁴⁻⁵⁾

기존의 소성수축균열에 대한 연구는 콘크리트의 페이스트량의 다소에 따른 영향검토, 플라이애쉬를 이용한 수화열 저감의 영향에 대한 검토⁶⁻¹¹⁾가 주류를 이루어 왔으나, 수축균열의 주요인 중의 하나인 양생조건 영향에 대한 검토는 미흡한 실정이다.

본 연구는 소성수축균열발생이 주로 콘크리트 표면에서의 수분증발, 고온에서의 수화열에 기인한다는 점을 착안하여, 플라이애쉬를 대체한 콘크리트의 양생조건에 따른 소성수축균열 발생 패턴 및 그 특성을 파악하기 위한 것이다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 실험의 실험계획은 표 1과 같다. 콘크리트 배합은 물결합재~비를 45%로 하고, 플라이애쉬의 대체율을 시멘트 대체 대비 0~20%로 하여 5%단위로 나누어 총 5개의 배치로 설정하였다. 굳지 않은 콘크리트는 혼합 후 기초물성을 파악하기 위하여 슬럼프 및 공기량을 측정하였다. 그리고 콘크리트의 응결시간과 블리딩을 측정하였다. 경화 콘크리트에 대하여는 압축강도를 측정하였고, 균열의 제어요인 중 하나인 인장강도를 측정하였다.

* 대전대학교 건축공학과 교수, 정회원

** 한국수력원자력(주) 연구원

콘크리트에서 No.4(5mm)체를 이용하여 모르타르를 추출하여 플라이애쉬를 대체율에 따른 단열수화온도를 측정하고, 모르타르의 수분 증발량 측정, 소성수축균열균열의 특성을 파악한다.

표 1. 실험 계획

물결합재비 (%)	플라이애쉬 대체율 (%)	측정항목	
45	0 5 10	균지 않은 콘크리트	슬럼프
			공기량
			블리딩
	15 20	경화 콘크리트	응결시간
			압축강도
			인장강도
콘크리트 추출 모르타르		단열수화 온도	
		수분증발량	
		소성수축균열	

콘크리트에서 추출한 모르타르의 양생방법은 실내양생(풍속 0, 300, 500m/min), 실외양생(막양생, 노출양생), 챔버양생(온도 50℃)을 실시하였다. 소성수축균열의 양생방법 및 양생조건은 표 2와 같다.

표 2. 소성수축균열의 양생조건

측정 항목	양생방법	양생조건			
		풍속	온도	습도	
소성수축균열	실내양생	0m/min	21℃	64%	
		300m/min			
		500m/min			
	실외양생	노출	100m/min	35℃	43%
		막(비닐보호)	0m/min		
	챔버양생		0m/min	50℃	50%

2.2 사용재료

2.2.1 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 그 물리·화학적 성질 및 주요성분비는 표 3와 같다.

표 3. 시멘트의 물리적 성질 및 주요성분비(%)

종류	비중	분말도 (cm ² /g)	안정성	압축강도 (kgf/cm ²)			
				3일	7일	28일	
1종 보통 포틀랜드 시멘트	3.15	3,200	양호	200	290	380	
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
62.2	20.3	6.0	3.39	3.2	2.4	0.78	0.14

2.2.2 플라이애쉬

플라이애쉬는 국내 삼천포산으로 그 물리·화학적 성질을 아래 표 4와 같다.

표 4. 플라이애쉬의 물리·화학적 성질

품명	분말도 (cm ² /g)	주성분	비중 (g/cm ³)	강열감량 (%)
플라이애쉬 (삼천포산)	3,524	SiO ₂ (50%) Al ₂ O ₃ (25%) Fe ₂ O ₃ (5%) CaO, MgO, TiO ₂ 미량 함유	2.17	2.20

2.2.3 골재

골재의 물리적 성질은 표 5와 같다. 세골재로는 충남 연기군 대평리산 강모래, 조골재로는 대전광역시 서구 어남동산 쇠석 25mm를 사용하였다.

표 5. 골재의 물리적 성질

골재종류	최대입경 (mm)	비중	조립률 (FM)	흡수율 (%)
세골재(세척사)	5	2.50	2.57	1.15
조골재(쇠석)	25	2.84	6.87	0.98

2.3 실험방법

2.3.1 배합 및 비빔방법

1) 콘크리트의 배합

본 실험의 콘크리트 배합은 표 6과 같다. 물결합재비를 45%로 하고 플라이애쉬의 혼입율을 시멘트 대체 대비 0~20%로 하여 5%단위로 나누어 총 5개의 배치로 설정하였다. 조골재의 최대크기는 25mm, 단위수량은 170kg/m³이며 세골재율은 50%로 하였다. 본 실험에서 목표슬럼프는 15±3cm로 하였다.

2) 모르타르의 추출방법

비빔방법에 있어서는 100ℓ 강제 팬타입 믹서를 이용하였으며 그림 1과 같은 방법을 채택하여 처음 60초간 시멘트, 플라이애쉬를 넣고 건비빔을 한 후, 혼합수를 첨가 후 120초를 다시 비빔 후, 세골재를 투입하여 60초간 비빔 한 다음, 마지막으로 조골재를 60초를 비빔 하였다. 그리고 콘크리트를 NO. 4번 (5mm)의 체로 체가름하여 모르타르를 추출하였다.

표 6. 콘크리트 배합

물결합재비 (%)	최대골재크기 (mm)	목표슬럼프 (cm)	플라이애쉬 대체율 (%)	세골재율 (%)	단위수량 (kg/m ³)	용적배합 (ℓ/m ³)				중량배합 (kg/m ³)			
						C	FA	S	G	C	FA	S	G
45	25	15±3	0	50	170	120	0	350	350	378	0	875	994
			5			114	6			359	19		
			10			108	12			340	38		
			15			102	18			321	57		
			20			96	24			302	76		

* C : Cement , FA : Fly Ash

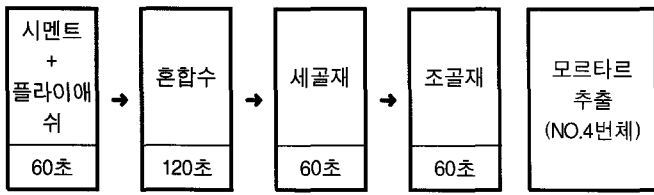


그림 1. 콘크리트비빔 및 모르타르 추출

3) 실험체 번호

그림 2는 실험체 번호이다. C-F-★는 C는 Crack이고, F는 Fly ash, ★은 플라이애쉬를 시멘트에 대체한 비율을 표기한 것이다. 예로 C-F-5같은 경우 시멘트에 플라이애쉬를 5%로 대체한 것이다.

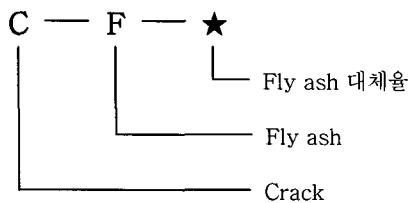


그림 2. 실험체 번호

2.3.2 실험방법

1) 굳지 않은 콘크리트 시험방법

굳지 않은 콘크리트의 시험방법은 슬럼프 시험방법은 KS F 2402, 공기량 시험방법은 KS F 2421, 응결시간은 KS L 5103 길모어 침(Gilmour needles)법에 의한 시험방법으로 한다. 또한 블리딩 시험방법은 KS F 2414에 준하여 측정한다.

2) 경화 콘크리트 시험방법

경화 콘크리트에 대해서는 압축강도 시험방법은 KS F 2405, 할열 인장강도 시험(Splitting Tensile strength)시험을 KS F 2423 규정에 의해 압축강도 시험용 시험기로 측정한다.

3) 단열수화온도

단열수화온도를 측정하기 위해서 두께 10cm의 발포폴리스틸렌수지로 내장하여 단열처리하고 50×50×50cm 입방형 단열거푸집에 콘크리트를 비빔 후 굵은 골재를 제거하기 위하여 NO. 4(5mm)의 체로 체가름한 모르타르를 채운 후 중앙부에 단열온도센서를 설치하고, 온도측정장치인 Maturity Meter에 연결하여 수화온도를 측정한다.

4) 수분 증발량

수분증발을 측정하기 위해서 28×22×5cm의 스텐레스제 시료편을 이용하여, 실내에서 풍속 0, 300, 500m/min으로 모르타르의 수분 증발을 60분 간격으로 0~420분까지 중량을 계량하여 측정하였다.

5) 소성수축균열

소성수축균열을 측정하기 위해서 60×90×2cm의 시험체는 그림 3과 같다. Polyethylene film은 밀의 판과 모르타르 수분의 흡수를 방지하기 위해 설치하였고, 못은 3선 5cm간격으로 하여

모르타르를 초기팽창 후 모르타르의 건조시 자유수축변화를 막기 위해 설치하였다.

소성수축균열은 플라이애쉬 대체량에 따라 콘크리트 양생조건은 실내양생(풍속 0, 300, 500m/min), 실외양생(막양생, 노출양생), 챔버양생(온도 50℃)으로 하였다. 풍속은 Kra112의 실험에 의하면 균열이 콘크리트 타설 후 2~4시간동안 바람을 불어주면 균열이 발생되므로 5시간 연속으로 시험체에 같은 풍속을 주었다. 균열의 시작 시점을 측정하고, 종결시점인 12시간 경과 후 확대경을 이용하여 균열을 측정한다.

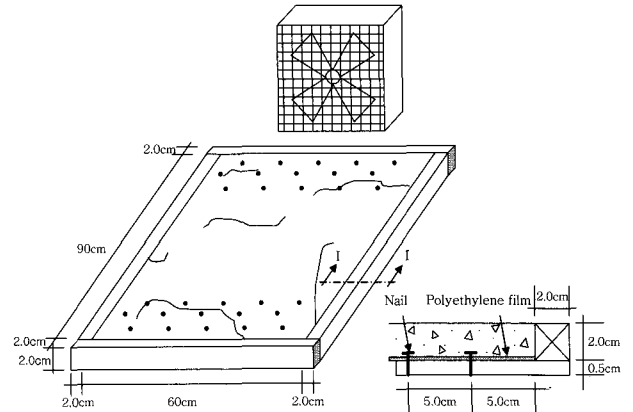


그림 3. 소성수축균열 시험체

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 굳지 않은 콘크리트 특성

3.1.1 슬럼프

그림 4는 플라이애쉬를 시멘트에 대체하였을 때의 슬럼프 측정결과를 나타낸 것이다. 슬럼프 시험결과 플라이애쉬를 대체하지 않은 콘크리트에 비해 대체율 5~20%에서 슬럼프의 값이 14~35%증가하는 경향으로 플라이애쉬 콘크리트가 유동성을 향상시키는 결과를 보이고 있다. 플라이애쉬의 대체율이 증가함에 따라 콘크리트의 성형성이 개선되며, 점착성도 증가한다. 둥근모양의 플라이애쉬 입자는 시멘트 페이스트의 유동성을 개선시켜, 소요의 슬럼프를 확보하기 위한 콘크리트의 단위수량을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

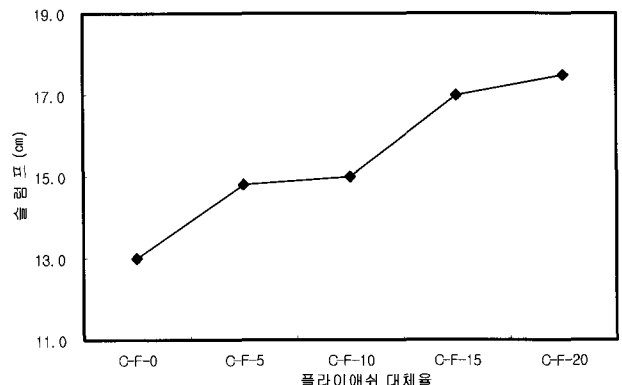


그림 4. 플라이애쉬 대체율별 슬럼프 변화

3.1.2 공기량

그림 5는 공기량측정 시험결과이다. 플라이애쉬를 시멘트에 대체한 공기량의 영향은 슬럼프와는 반대로 플라이애쉬를 대체함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 최대 20% 대체시 35%의 공기량이 감소하는 결과를 보이고 있다.

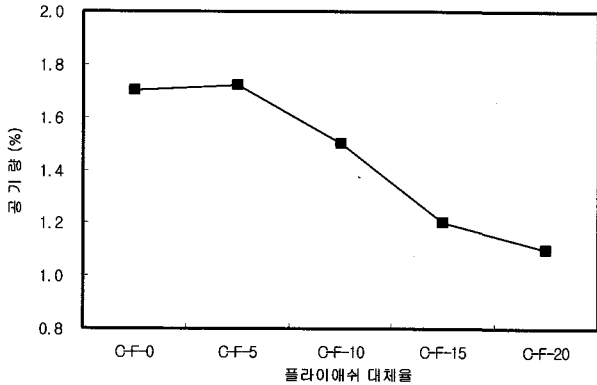


그림 5. 플라이애쉬 대체율별 공기량 변화

3.1.3 블리딩

그림 6은 플라이애쉬를 시멘트에 대체하였을 때의 블리딩 수를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 플라이애쉬를 대체하지 않은 콘크리트에 비해 5~20%까지 대체한 콘크리트의 블리딩 수가 현저하게 감소하는 경향이 나타났다.

플라이애쉬 20% 대체한 콘크리트가 대체하지 않은 콘크리트에 비해 거의 절반에 가까운 블리딩 수가 감소하는 경향이 나타났다. 플라이애쉬 20%를 대체한 콘크리트와 플라이애쉬를 대체하지 않은 콘크리트를 비교한 결과 측정 후 30분까지 블리딩 수의 차이가 가장 크게 나타났으며, 50분경과 후부터 블리딩은 소량으로 일어나는 것으로 나타났다.

플라이애쉬의 사용에 따른 미분말 용적의 증가는 콘크리트 내부에서 수분의 이동을 감소시키며, 잔골재사이의 공극을 미립분으로 채워주어 상승수의 통로를 차단하므로 콘크리트의 블리딩 수를 억제하는 것으로 판단된다.

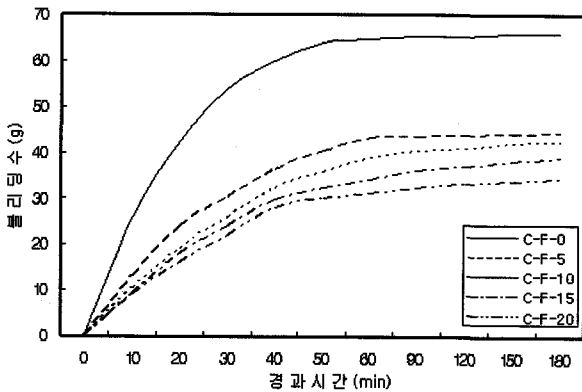


그림 6. 플라이애쉬 대체율별 블리딩 변화

3.1.4 응결시간

그림 7은 플라이애쉬를 시멘트에 0~20%까지 대체하여 시멘

트페이스트의 응결시간을 측정된 결과이다.

플라이애쉬를 시멘트에 대체하였을 때는 응결의 지연성상을 보이는 것으로 나타났다. 플라이애쉬 20% 대체하였을 때는 미대체시에 비해 1시간 23분의 응결지연되는 것을 볼 수 있다. 플라이애쉬의 대체에 따라 단위시멘트량의 감소로 상대적으로 느린 포졸란 반응을 일으켜 그로인해 응결지연효과가 있기 때문인 것을 판단된다.

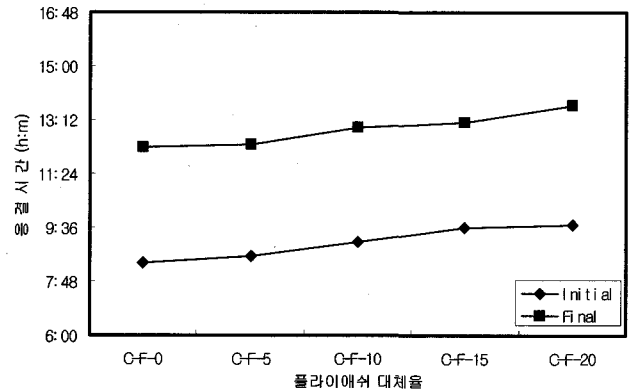


그림 7. 플라이애쉬 대체율별 응결시간 변화

3.2 경화 콘크리트 특성

3.2.1 압축강도

그림 8은 플라이애쉬를 시멘트에 0~20%까지 대체하여 콘크리트의 재령 3, 7, 28, 56, 91일의 압축강도를 측정된 결과이다.

초기재령의 3, 7일 강도는 플라이애쉬 미대체시에 비해 플라이애쉬를 대체한 콘크리트의 압축강도가 떨어지는 것을 알 수 있으나, 재령 28일은 플라이애쉬 대체율 15, 20% 콘크리트에서 38%의 강도감소를 보였으나 대체율 5, 10%는 미대체경우보다 높은 압축강도를 발현하였다. 재령 56일에서는 플라이애쉬 대체율 5, 10, 15%에서는 미대체한 경우보다 높은 강도를 발현했고, 대체율 20%에서는 대체하지 않은 콘크리트와 비슷한 압축강도 발현을 보였다. 재령 91일 때는 미대체경우보다 플라이애쉬를 대체한 모든 실험체가 높은 압축강도를 나타내는 것을 볼 수 있어, 플라이애쉬의 대체에 따라 장기강도에 효과가 있다는 것을 나타내 주고 있다.

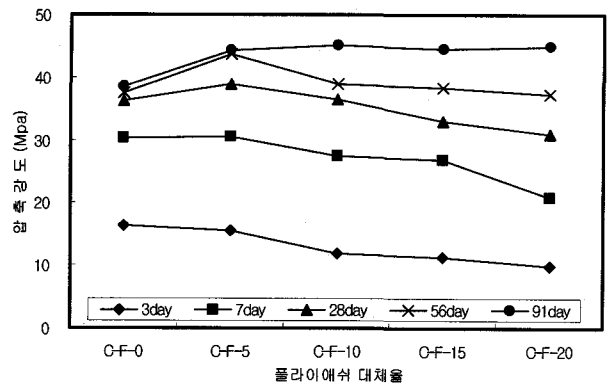


그림 8. 재령별 압축강도 변화

이것은 시간이 경과함에 따라 시멘트의 수화생성물인 수산

화칼슘이 플라이애쉬의 가용성 실리카 및 알루미늄과 화합하여 규산석회 및 알루미늄산삼석회 등의 수화물을 생성하고 이들이 장기강도의 증진에 큰 역할을 하는 것으로 판단된다.

3.2.2 활열인장강도

그림 9는 플라이애쉬를 시멘트에 0~20%까지 대체하여 콘크리트의 재령 1, 3, 7, 28, 56일 인장강도를 측정된 결과이다.

초기재령인 1, 3, 7일 플라이애쉬를 대체한 콘크리트의 인장강도는 미대체한 경우보다 낮게 발현되었으나, 재령 28일은 미대체시와 비슷한 인장강도가 나타났으며, 재령 56일에는 미대체시보다 높은 인장강도를 보여주고 있어 재령에 따른 인장강도 발현은 압축강도의 경우와 유사한 경향을 나타내고 있다.

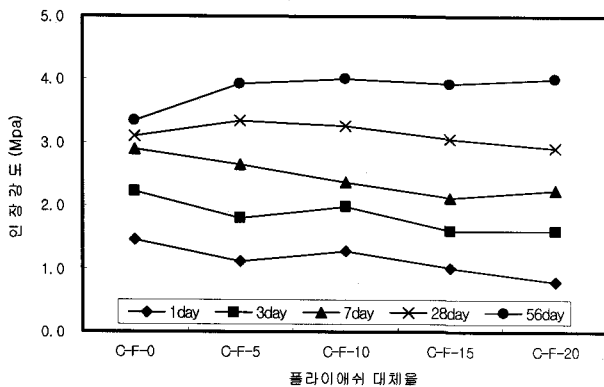


그림 9. 재령별 인장강도 변화

3.2.3 인장강도와 압축강도비

그림 10은 플라이애쉬를 시멘트에 0~20%까지 대체하여 콘크리트의 재령 3, 7, 28, 56일의 인장강도와 압축강도비를 나타낸 것이다.

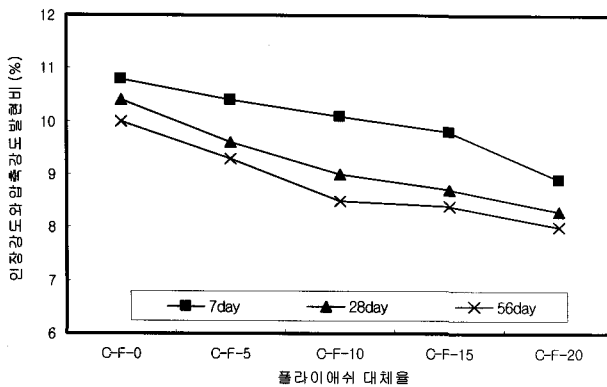


그림 10. 재령별 인장강도와 압축강도비

재령 3일에는 11.6~16.8%의 강도비가 나왔으며, 재령이 증가함에 따라 강도비가 감소하는 경향을 보였다.

이것은 장기재령으로 갈수록 압축강도 증진률이 인장강도 증진률보다 크다는 것을 보여주고 있다. 따라서, 플라이애쉬 대체율이 클수록 인장압축비는 감소하는 경향을 보여주고 있다. 초기재령의 인장강도 개선에는 플라이애쉬 대체가 효과적이지 못한 것으로 나타났다.

이것은 플라이애쉬 사용으로 인한 포졸란 반응효과가 지연

되어 골재와 시멘트 매트릭스 사이의 계면(Transition zone)의 취약성을 초기재령에서는 크게 개선시키지는 못하는 것을 보여주는 것으로 판단된다.

3.3 기타 특성

3.3.1 단일수화온도

그림 11에서와 같이 플라이애쉬 대체율이 높을수록 단일수화온도가 감소하는 경향을 보여주고 있다. 플라이애쉬 미대체한 모르타르와 플라이애쉬 20% 대체한 모르타르를 비교한 결과 최고온도차는 타설 후 12시간 경과 후 12.5°C의 온도차가 나타났다. 단일수화온도는 타설 후 점점 증가하여 타설 30시간 경과 후 최고 단일수화온도에 도달하는 것을 보여주고 있다. 이때 플라이애쉬를 대체하지 않은 것에 비해 플라이애쉬 20% 대체할 경우 단일수화온도차는 24시간 경과 후 10.3°C, 30시간 경과 후 7.5°C로 나타났다. 30시간 경과 후부터는 온도가 점차 하강하기 시작하는 것으로 나타났다. 이러한 플라이애쉬를 대체한 모르타르의 단일수화온도감소는 시멘트의 일부를 플라이애쉬로 대체함으로써 단위시멘트량이 감소한 결과로 여겨진다.

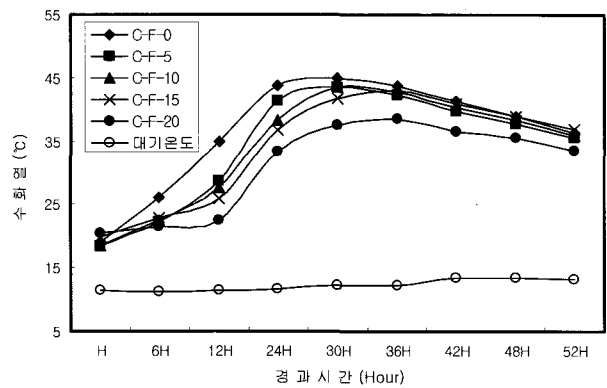


그림 11. 단일수화온도변화

3.3.2 수분 증발량

그림 12는 콘크리트 추출 모르타르의 플라이애쉬 미대체한 시료를 60분 간격으로 풍속에 따른 수분증발량을 측정된 결과이다.

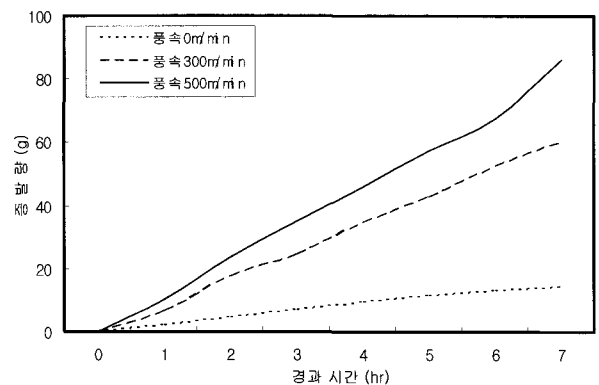


그림 12. 수분 증발량

실내양생의 풍속 0, 300, 500m/min일 경우 수분증발량은 풍속이 빠를수록 증가하는 것을 알 수 있다.

1시간 경과 후 실내양생의 풍속 0m/min보다 300m/min가 3.6배정도의 증발량의 증가를 볼 수 있으며, 500m/min은 6.5배 정도 증발하는 것을 알 수 있다. 이것은 풍속에 의해 수분의 증발이 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

3.3.3 블리딩과 수분증발량

그림 13은 블리딩과 수분증발량을 나타낸 결과이다. 블리딩은 시간의 경과에 따라 감소하는 경향을 보였고, 수분증발은 일정하게 증가하는 것으로 나타났다. 30분경과후 ACI의 균열 발생 가능성이 있는 1.0kgf/m²을 지났지만, 초기균열은 45분부터 발생하기 시작하였다. 소성수축균열은 수분증발량이 블리딩보다 높은 시점 이후부터 발생하는 것으로 나타났다. 플라이애쉬 미대체시는 초기균열이 콘크리트 표면의 블리딩이 발생하지 않는 90분이후에 발생하였으며, 플라이애쉬를 시멘트에 대체함에 따라 60분이전에 초기균열이 발생하였다. 이것은 플라이애쉬 미대체시는 초기에는 블리딩이 많이 발생하여 증발량보다 크게되므로 균열발생이 일어나지 않고, 블리딩이 감소하는 시점인 90분 이후에 초기균열이 발생하는 것으로 판단되며, 플라이애쉬가 시멘트에 대체함에 따라 블리딩이 적게 발생하여 수분증발량이 상대적으로 커짐에 따라 초기균열이 빨리 발생하는 것으로 판단된다.

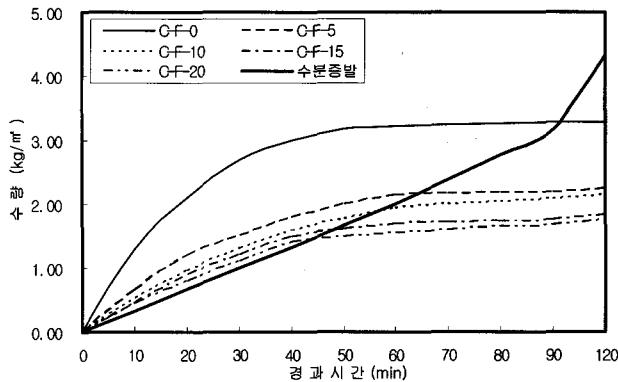


그림 13. 블리딩과 수분증발량

3.4 양생조건에 따른 소성수축균열

표 7은 양생조건별 소성수축균열길이, 표 8은 양생조건별 소성수축균열면적을 나타낸 것이다. 표 7, 8에서 균열길이와 균열면적이 유사한 양상을 보이고 있어, 균열면적을 중심으로 양생조건에 따른 소성수축균열 특성을 비교 분석한다.

3.4.1 풍속변화에 따른 균열 특성

그림 14는 실내양생 풍속변화에 따른 표면균열의 균열면적을 비교한 것이다. 플라이애쉬 미대체 경우 풍속 0m/min을 기준으로하여 풍속변화에 따라 풍속(300m/min)양생은 균열면적 19%증가, 풍속(500m/min)양생은 39%의 균열면적 증가하였다. 플라이애쉬 20%대체 경우 풍속 0m/min을 기준으로 하여 풍속변화에 따라 풍속(300m/min)양생은 균열면적 22%증가, 풍속(500m/min)양생은 369%의 균열면적 증가하였다. 따라서 풍속이 증가함에 따라 균열면적이 증가하는 것을 알 수 있다.

이것은 풍속증가로 인해 수분증발량의 블리딩보다 많이 발

생하여 건조수축이 커짐에 따라 균열길이와 균열면적이 증가하는 것으로 판단된다.

표 7. 양생조건별 소성수축 균열길이 (단위:mm)

실험체		C-F-0	C-F-5	C-F-10	C-F-15	C-F-20
실내양생	0 m/min	1152	743	375	204	69
	300 m/min	1412	792	584	304	285
	500 m/min	1844	1056	789	578	376
실외양생	노출	2658	2094	1835	1452	1349
	막	2458	2046	1754	1433	615
챔버양생		2341	1310	687	641	440

표 8. 양생조건별 소성수축 균열면적 (단위:mm²)

실험체		C-F-0	C-F-5	C-F-10	C-F-15	C-F-20	온도 (°C)	습도 (%)
실내양생	0 m/min	1745	854	431	235	98	21	64
	300 m/min	2091	1047	565	285	120		
	500 m/min	2437	1240	999	706	364		
실외양생	노출	5377	4634	3928	3832	2446	34	43
	막	5174	4056	3557	2400	1131		
챔버양생		4942	2080	1094	1035	767	50	50

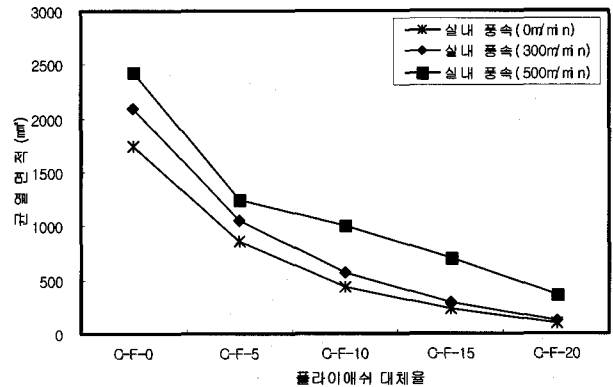


그림 14. 풍속변화에 따른 균열면적

3.4.2 실외에서의 노출양생과 막양생 따른 균열 특성

그림 15는 표면균열의 실외에서의 노출양생과 막양생의 균열면적의 현상을 나타낸 것이다. 노출양생과 막양생은 플라이애쉬의 대체율의 증가에 따라 균열면적이 감소하는 경향을 나타냈다. 플라이애쉬 미대체시의 균열면적은 막양생에 비해 노출양생이 4%증가하고, 플라이애쉬 20% 대체시는 막양생에 비해 216%증가하는 것으로 나타났다. 이것은 표면이 햇빛과 바람에 직접 노출에 의한 수분 증발을 막(비닐)이 막아 줌으로써 노출양생보다 막양생이 더 낮은 균열면적을 보이고 있는 것으로 판단된다. 노출양생의 경우 대체율이 증가할수록 균열면적비율이

막양생의 경우에 비하여 급격히 증가하는 경향을 보였다.

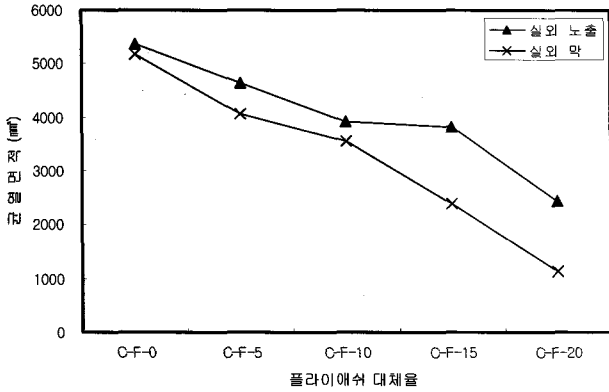


그림 15. 노출양생과 막양생 균열면적

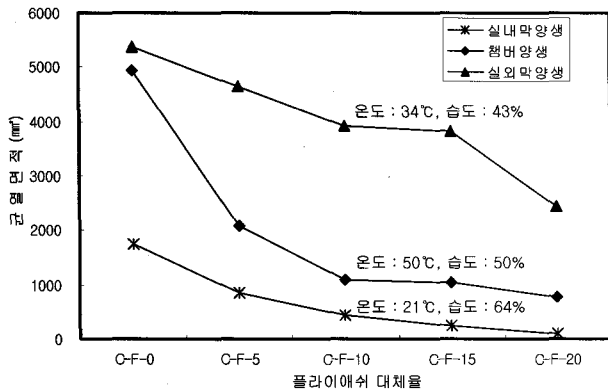


그림 16. 온·습도변화에 따른 균열면적

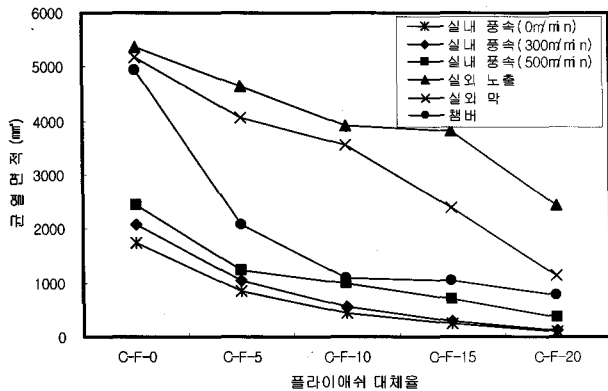


그림 17. 양생조건에 따른 소성수축균열면적

3.4.3 챔버양생 소성수축 균열특성

온도챔버를 50°C로 유지하여 양생한 결과 균열길이는 440.41~2341.80mm, 균열면적 767.69~4942.54mm²로 측정되었다. 균열이 발생한 곳은 표면 전체적으로 발생하였다.

플라이애쉬 대체율이 증가함에 따라 균열개수, 균열길이, 균열면적이 감소하였다.

균열길이는 플라이애쉬 미대체에 비해 플라이애쉬 5%대체시에 44%까지 감소하고, 20%대체시 81%까지 감소율을 보였다. 균열면적은 플라이애쉬 미대체에 비해 플라이애쉬 5%대체시 58%까지 감소하고, 20%대체시에는 미대체에의 84%까지 감소하는 것으로 나타났다.

구분	실내 풍속양생		
	0m/min	300m/min	500m/min
C-F-0			
C-F-5			
C-F-10			
C-F-15			
C-F-20			
구분	노출양생	실외막양생	챔버양생
C-F-0			
C-F-5			
C-F-10			
C-F-15			
C-F-20			

그림 18. 양생조건에 따른 소성수축균열 패턴

3.4.4 온·습도변화에 따른 균열특성

그림 16은 표면균열의 실내·외와 챔버양생의 균열면적을 현상으로 나타낸 것이다. 양생은 풍속이 없는 같은 조건하에 온도와 습도만 변화시킨 실내막양생(풍속 0m/min, 온도 21°C, 습도 64%), 실외 막양생(온도 35°C, 습도 43%)과 챔버양생(온도 50°C, 습도 50%)경우를 비교한 것이다. 실외막양생과 챔버양생은 플라이애쉬 미대체와 유사한 균열면적을 보였으나, 플라이애쉬의 대체율이 증가함에 따라 플라이애쉬의 수화열 저감효과에 의해 균열 면적이 감소하는 것으로 나타났다.

균열면적은 실외막양생, 챔버양생, 실내막양생 순으로 많이 발생하였으며, 온도가 높은 챔버양생보다 온도가 낮은 실외막양생이 높은 균열면적을 나타냈다. 그러나 습도가 낮은 순으로 균열면적이 더 커짐으로 균열면적이 온도의 영향보다는 습도

의 영향을 더 받는다는 것을 보여주고 있다.

3.4.5 양생조건에 따른 소성수축균열면적 비교

그림 17과 18은 양생조건에 따른 소성수축균열면적을 나타낸 것이다. 소성수축 균열은 플라이애쉬를 대체한 경우 대체하지 않은 경우보다 균열면적이 크게 감소하였다. 특히 실내양생의 경우 실내막양생(풍속 0m/min)을 기준으로 할때 풍속 500m/min의 플라이애쉬 대체 20%인 경우 21%정도의 균열이 발생하여 79%정도 균열감소효과를 보여주고 있다. 실내막양생(0m/min)의 플라이애쉬 미대체를 기준으로 할때 실외노출양생 미대체경우 3배정도로 균열면적이 증가했다. 양생방법에 따라 서로 다른 대체율 일지라도 균열면적을 비교해보면 실외양생, 챔버양생, 실내양생 순으로 균열면적이 적어지는 것으로 나타났다. 양생방법에 따른 균열면적은 습도가 가장 낮은 실외노출양생의 경우에 가장 크게 나타났으며, 플라이애쉬를 20% 대체한 경우에도 실내 막양생(풍속 0m/min)보다 40%의 균열면적이 증가하였다.

그림 18은 소성수축균열패턴을 나타낸 것이다. 소성수축균열은 모두 측면 구속변에 평행하게 발생되었다. 균열개수 및 길이는 실내양생, 챔버양생, 실외 막양생, 노출양생 순으로 증가하는 경향을 보였고, 각 균열의 폭은 0.5~3.0mm범위를 이루며, 균열이 많이 일어난 양생조건일수록 그 폭이 크게 나타났다. 또, 플라이애쉬 대체량이 많을수록 균열 폭이 적어지는 경향을 보여주었다.

4. 결 론

본 연구에서는 플라이애쉬 대체율과 양생조건변화에 따른 초기 소성수축균열 특성을 파악하기 위해 비교분석한 실험 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 슬럼프는 플라이애쉬 대체율이 증가함에 따라 커지며, 공기량은 플라이애쉬 대체율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 블리딩은 플라이애쉬를 대체한 콘크리트가 미대체한 콘크리트보다 감소하는 경향을 보였다.
- 2) 압축강도는 플라이애쉬를 대체한 경우 재령 56일이후부터 미대체한 경우에 비해 강도가 증가하는 경향을 보였고, 인장강도는 재령 28일이후부터 플라이애쉬 대체한 경우의 인장강도가 높아졌다.
- 3) 단열수화온도는 플라이애쉬 대체율이 증가함에 따라 수화온도는 감소하는 경향을 보였고, 플라이애쉬 대체율이 클수록 균열발생면적은 감소하지만, 초기균열발생시점이 빨라지는 경향을 보였다.
- 4) 실내막양생, 실외노출양생, 실외막양생일때의 균열개수, 균열길이, 균열폭, 균열면적은 플라이애쉬 대체율의 증가에 따라 감소하는 경향을 보였고, 실내양생의 경우 풍속이 증

가함에 따라 균열면적이 증가하였다. 또한 실외노출, 실외막양생, 실내양생 순으로 균열이 감소하는 경향을 보여주고 있다.

- 5) 온·습도 변화에 따른 균열발생은 온도의 영향보다는 습도의 영향을 더 크게 받는 것으로 나타났고, 상대습도가 적을수록 균열이 증가하는 경향을 보였다.
- 6) 본 연구범위에서는 플라이애쉬 대체가 소성수축균열제어에 큰 역할을 하는 것으로 나타나, 플라이애쉬는 콘크리트 28일 압축강도에 영향을 주지 않은 범위인 10%정도 치환 사용하는 것이 적절한 것을 판단된다.

양생방법별 소성수축균열은 콘크리트 표면수분증발량이 많고, 상대습도가 낮은 양생일 수록 크게 일어나는 것으로 나타나, 콘크리트 타설 직후부터 표면 습포양생 등으로 상대습도를 유지하면서 비닐 등 막양생을 병행하는 것이 소성수축균열 제어에 효과적일 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) 문승호, "콘크리트 구조균열", 기문당, 2001.
- 2) 한국콘크리트학회, "최신콘크리트공학" 2005, pp. 505-525
- 3) 김진근, "콘크리트 균열의 원인", 한국콘크리트학회, Vol.6 No.4, 1994, pp. 6-16
- 4) 최완철, "콘크리트 구조물의 균열체계에 따른 균열제어와 대책", Vol.6 No.4, 1994, pp. 17-24
- 5) 한국과학기술원, "콘크리트 구조물의 균열 제어 기술 개발", 과학기술부, 2000, pp 203-213
- 6) Kraai, Paul P., "A proposed Test to Determine the Cracking Potential Due to Drying Shrinkage of Concrete." Concrete Construction, V.30, No.9, Sept. 1985, pp. 775-778
- 7) Concrete Society Report, "Non-structural Cracks in Concrete", Technical Report No.22, 3rd Edn, pp. 44
- 8) Shalon, R., and Ravina, D., "Studies in Concreting in Hot Countries," Proceedings, International Symposium on Concrete and Reinforced Concrete in Hot Countries, Building Research Institute, Haifa, 1960, V.1, pp. 46
- 9) Lerch, W., "Plastic Shrinkage," ACI Journal, Proceedings V.53, NO.8, Feb. 1957, pp. 797-802.
- 10) BAMFORTH, P.B. "Insitu measurement of the effects of partial Portland cement replacement using either flyash or ground granulated blast furnace slag on the performance of mass concrete." Proceeding of the Institution of Civil Engineers. Part 2. Vol.69. Sept. 1980. pp. 777-800
- 11) Davis, "Properties of Cements and Concretes Containing Fly Ash", ACI J. Proc., Vol. 33. No. 5, May-June. 1937, pp. 577-612
- 12) KRAL, S. and GEBAUER, J. "Shrinkage and cracking of concrete at early ages. Proceedings of International Symposium on Slabs." Dundee 1979. Advances in Concrete Slab Technology. London, Pergamon Press, 1980. pp. 412-420